



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Estudio de la costa de Cantabria para la ubicación óptima de arrecifes artificiales

Trabajo realizado por:

Héctor Castanedo Manchón

Dirigido:

Bárbara Ondiviela Eizaguirre

Daniel Castro Fresno

Titulación:

Grado en Ingeniería Civil

Santander, julio de 2021

TRABAJO FIN DE GRADO

Agradecimientos

Quiero agradecer al personal del IH y de GITECO su gran aportación a este trabajo, sin ellos habría sido sumamente más laborioso; en concreto, quiero agradecer a Alejandro Alonso, Antonio Tomás, Elvira Ramos y Sheila Abad y a mis excelentes profesores Sonia Castanedo y Fernando Méndez por resolver todas las dudas que me surgieron. Por supuesto, este trabajo no habría sido posible sin las aportaciones de mis tutores Bárbara Ondiviela y Daniel Castro.

En especial, quiero agradecer a mis padres su incondicional apoyo y ayuda cuando más hizo falta.

Gracias a todos.

Resumen

Título: Estudio de la costa de Cantabria para la ubicación óptima de arrecifes artificiales.

Autor: Héctor Castanedo Manchón

Directores: Daniel Castro Fresno y Bárbara Ondiviela Eizaguirre

Mención: Hidrología

Convocatoria: julio 2021

Palabras clave: Arrecife artificial, biodiversidad, vida submarina, Cantabria, análisis costero, conectividad, usos del espacio marítimo,

El tema abordado en el presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) es el análisis de la costa de Cantabria para la ubicación óptima de arrecifes artificiales.

La instalación de arrecifes artificiales puede generar un aumento de la biodiversidad en el medio marino si se elige bien su ubicación, pues estos velan por aumentar la conectividad ecológica y sirven de apoyo a las comunidades de organismos que llegan hasta ellos. El objetivo fundamental del trabajo ha sido el desarrollo de una metodología válida para poder replicar este estudio en otras zonas con distintas características a las de la costa cantábrica.

La instalación de los arrecifes en zonas no óptimas, sea por condiciones físicas o biológicas, puede ocasionar que los organismos no lleguen hasta ellos o no se puedan llegar a asentar, por lo que su implantación habría sido en vano. También se ha de cuidar que no interfieran negativamente con los distintos usos del espacio marítimo para no suponer ningún obstáculo a las actividades antrópicas que se desarrollan en la zona.

Se han realizado por tanto dos análisis consecutivos. En el primero se han identificados las zonas que resultan física y biológicamente idóneas para la implantación de los arrecifes atendiendo a un conjunto de variables seleccionadas. Dadas las zonas que son física y biológicamente óptimas al mismo tiempo, en el segundo análisis, se ha evaluado la compatibilidad de las zonas idóneas con los usos del espacio marítimo, de tal forma que se descartaron aquellas zonas donde existía interferencia entre el uso del espacio y el arrecife se llegó al resultado de zonas óptimas que no se veían afectadas por el arrecife.

Como resultado de aplicar esta metodología en la zona de estudio se han obtenido cuatro zonas calificadas como óptimas en las que se pueden instalar los arrecifes artificiales para que estos desarrollen su función de la manera esperada.

Abstract

Title: Study of the Cantabrian coast for the optimal location of artificial reefs.

Author: Héctor Castanedo Manchón

Directors: Daniel Castro Fresno and Bárbara Ondiviela Eizaguirre

Minor: Hidrology

Call: July 2021

Key words: Arrecife artificial, biodiversity, live below water, Cantabria, coastal analysis, conectivity, uses of the maritime space

The topic addressed in this Final Degree Project (TFG) is the analysis of the Cantabrian coast for the optimal location of artificial reefs.

The installation of reefs in non-optimal areas, either due to physical or biological conditions, can cause the organisms not to reach them or not being able to settle, so their implantation would have been futile. Care must also be taken that they do not negatively interfere with the different uses of the maritime space so as not to pose any obstacle to the anthropic activities that take place in the area.

If the reefs are installed in aggressive environments, either due to physical or biological conditions, the organisms will not reach them or they will not be able to settle, so their implantation will have been in vain. Care must also be taken that they do not negatively interfere with the different uses of maritime space so as not to pose any obstacle to anthropic activities that take place in the area.

Therefore, two consecutive analyzes have been carried out. In the first one, the areas that are physically and biologically suitable for the implantation of reefs have been identified according to different criteria. Given the areas that are physically and biologically optimal at the same time, in the second analysis, the compatibility of the ideal areas with the uses of the maritime space has been evaluated, in such a way that those areas where there was interference between the use of the space were discarded. and the reef was found to be optimal zones that were not affected by the reef.

As a result of applying this methodology in the area of study, four different areas classified as optimal have been obtained, in which artificial reefs can be installed so that they develop their function in the expected way.

Contenido

1.	Introducción	2
2.	Contextualización y ámbito espacial	3
3.	Objetivos	4
4.	Metodología.....	5
4.1.	Diseño del arrecife.....	5
4.2.	Variables y fuentes de información	6
4.3.	Evaluación de zonas óptimas.....	8
4.3.1.	Idoneidad Física	9
4.3.2.	Idoneidad Biológica	14
4.3.3.	Compatibilidad con los usos del espacio marítimo.....	17
4.4.	Análisis de los datos	19
5.	Resultados	21
5.1.	Análisis descriptivo de las variables.....	21
5.2.	Idoneidad Física	27
5.3.	Idoneidad Biológica	28
5.4.	Zonas potencialmente óptimas	29
5.5.	Compatibilidad con usos del espacio marítimo	30
6.	Conclusiones	33
7.	Referencias.....	34

1. Introducción

En 2015 los líderes mundiales reunidos en la ONU (Organización de las Naciones Unidas) desarrollaron lo que hoy se conoce como los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), los cuales incluyen 17 líneas de acción para en los siguientes 15 años, lograr erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad de las generaciones venideras y de la nuestra. Es decir, una agenda de dónde y cómo actuar para haber logrado una sociedad y un planeta más sostenibles y justos antes de 2030.



Imagen 1. Logo de los Objetivos de Desarrollo.

Fuente:

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> Sostenible



Imagen 2. ODS número 14.

Fuente:

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Entre estos objetivos está el de conservar y utilizar de manera sostenible los océanos, mares y recursos marinos, y entre sus metas está la conservación de la biodiversidad en el ámbito marino, que cada vez se encuentra en peores condiciones por la pesca abusiva y la contaminación y acidificación de las masas de agua.

No existe una solución única para acabar con la pérdida de biodiversidad sino un conjunto de alternativas que aseguran la mejora ecosistémica pasando por una producción más sostenible, mayor reciclaje, menor uso de combustibles fósiles y demás medidas para frenar esta contaminación. Pero también se necesitan otra serie de medidas para la recuperación de las comunidades de especies que se puedan haber perdido, y una de estas es el despliegue de arrecifes artificiales.

Un arrecife artificial es una estructura, o conjunto de estructuras, que independientemente de su forma y construcción con materiales inertes se despliega sobre el lecho marino y sirve de hábitat a las distintas especies marinas. Su motivación, en función de su tipología, puede ser de distinta índole, como elementos de gestión pesquera, o como defensa de la costa, pero también sirven para la recuperación y conservación de la biodiversidad del medio marino dando refugio a distintas especies y facilitando que sobre ellos mismos se desarrollen nuevos ecosistemas. Este último tipo de arrecife artificial persiguen desarrollar la vida marina en zonas con una reducida o limitada biodiversidad.

Los arrecifes artificiales comprenden tipologías que varían desde un elemento puntual de hormigón hasta buques hundidos. En todos los casos, su función esencial es aportar superficie para proporcionar hábitats de alimentación, refugio, descanso, o

reproducción a las comunidades biológicas, buscando además su conectividad con estructuras rocosas próximas que desempeñen funciones ecológicas equivalentes.

2. Contextualización y ámbito espacial

“Artificial Reef 3D printing for Atlantic Area” fue un proyecto europeo lanzado en 2016, dentro del plan INTERREG Atlantic Area, en el cual se buscaba la mejor alternativa geométrica impresa 3D con material sostenible y que fuera fácilmente replicable a gran escala para la fabricación de arrecifes artificiales. En un laboratorio de GITECO, en la Universidad de Cantabria, se llegó a la solución de arrecife que satisfacía estas condiciones y se



Imagen 3. Proceso de impresión de un arrecife artificial. Cedida por GITECO

implementó un caso piloto en el ámbito de la bahía de Santander.

Los arrecifes implementados dieron unos resultados excelentes en lo que al asentamiento de biodiversidad se refiere. En poco tiempo se desarrollaron comunidades de macroalgas y se encontraron organismos de mayor tamaño habitando en ellos, pero nunca fue objeto del proyecto la identificación de la zona más óptima en la que situar los arrecifes. La colocación se realizó en la bahía de Santander por las condiciones favorables de resguardo que esta ofrece, pero no se conoce el comportamiento de estos mismos arrecifes en aguas exteriores. Este trabajo de final de grado surge para desarrollar una metodología que, para una tipología de arrecife artificial dada, permita identificar las mejores zonas costeras, descartando las aguas interiores, en las que ubicar estas estructuras para su mejor desarrollo.

La elección de la zona de análisis para desarrollar la metodología ha de comprender ámbitos geográficos muy diversos para que se pueda extrapolar a la mayor cantidad de medios marinos posibles sin importar su complejidad. Para ello, se puso el foco en la costa de Cantabria. El conjunto del litoral cántabro es demasiado extenso como para abordar su estudio en una escala adecuada a los objetivos del estudio. Por tanto, la zona de estudio es la costa de Cantabria, desde la desembocadura del río Sabor que pasa por el municipio de Ontón, hasta la del río Deva que separa Cantabria de Asturias, lo cual constituye una solución intermedia entre las opciones consideradas, como se muestra en la *Figura 1*.



Figura 1. Mapa de situación. Generación propia con Arcmap.

En este ámbito geográfico se pueden encontrar gran cantidad de sistemas marinos de distinta índole, desde puertos pesqueros como los de Comillas, San Vicente, Suances, Laredo y Santoña hasta un puerto comercial como el de Santander, largas playas de arena como las de Berria y Valdearenas o sistemas rocosos submarinos como el de la costa de Suances e Isla. También se pueden encontrar condiciones de oleaje y corriente muy variables y ecosistemas muy diversos que pasan de acantilados verticales de gran profundidad, a aguas someras con fondos de arena, lo que le confiere al estudio un carácter generalista y extrapolable a otras zonas litorales.

3. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es diseñar y aplicar una metodología para la elección de ubicaciones óptimas para la instalación de arrecifes artificiales, con base en criterios físicos, biológicos y de compatibilidad con el uso de las aguas marítimas de Cantabria.

Este objetivo general se alcanzará a través de los siguientes objetivos específicos:

- Establecer criterios de selección físicos y biológicos que permitan replicar y extrapolar la metodología desarrollada a ámbitos espaciales distintos al del estudio.
- Analizar e identificar en la costa de Cantabria las zonas más óptimas para la ubicación de arrecifes artificiales.
- Identificar los principales condicionantes físicos del medio marino en función de las características del arrecife artificial.
- Identificar los principales condicionantes biológicos del medio marino en función de las características del medio próximo.
- Identificar las principales actividades del medio marino que condicionan la ubicación del arrecife.

4. Metodología

4.1. Diseño del arrecife

En el laboratorio de GITECO se llegó a dos soluciones de arrecife, una con forma prismática y otra con forma básicamente similar, pero con las esquinas redondeadas y base circular. Esta última solución consiste en una estructura de 90 cm de alto y aproximadamente 80 cm de diámetro y es la elegida para realizar el estudio por tener una forma más ovalada y redondeada en la punta que lo hace ser más hidrodinámico y tener el centro de gravedad más bajo que el prismático (*Figura 2*).

El arrecife cuenta con un peso de 750 kg y una base plana, está fabricado en mortero inerte sostenible impreso 3D sobre arena que se va vertiendo simultáneamente a la impresión y cuenta bajo su base con una placa circular de acero de 86 cm de diámetro y aproximadamente 250 kg de peso para ayudar a la estabilidad de la estructura.

El material con el que se fabrica el arrecife, una vez fragua, es poroso y tiene una textura rugosa y una superficie irregular que facilita el arraigo de algas. Además, dispone de once orificios en cada una de sus cuatro caras, uno de ellos pasante hasta la cara opuesta y otros seis que conectan con las caras anexas que dan cobijo a los organismos heterótrofos.

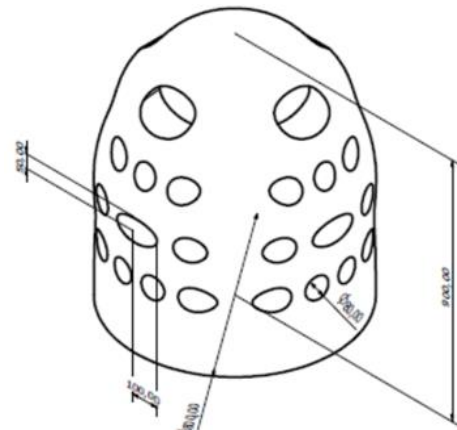


Figura 2: Dimensiones de un arrecife artificial.
Cedido por GITECO.

El estudio toma como referencia estos arrecifes por lo que sus características específicas suponen unas limitaciones referentes a sus materiales de construcción, su proceso constructivo y su geometría, al igual que otra tipología de arrecife tendría otras limitaciones distintas, por ello se consideran dos tipos de criterios de evaluación, físicos y biológicos, que servirán para establecer las zonas potencialmente viables para albergar arrecifes de estas características que sean totalmente funcionales y posteriormente se realiza un análisis de compatibilidad con otras actividades desarrolladas en el medio marino.

4.2. Variables y fuentes de información

Las zonas óptimas para la ubicación de arrecifes se definen a partir de las siguientes variables:

Idoneidad física:

- Batimetría (m)
La batimetría se ha obtenido del European Marine Observation and Data Network (EMODnet), <https://emodnet.eu/en>.
- Pendiente del fondo marino
La pendiente se ha calculado a partir de la capa de batimetría descargada del European Marine Observation and Data Network (EMODnet), <https://emodnet.eu/en>.
- Tipo de sustrato
El tipo de sustrato se ha obtenido a partir de los datos del IH Cantabria (2021).
- Estabilidad de la estructura
Se ha calculado a partir del artículo: *“Experimental study on stability of rocks for improvement and development of fishing ground in shallow sea”* (Akeda et al., 1992).

Idoneidad biológica

- Conectividad con el Hábitat 1170: Arrecifes (*sensu* Directiva 92/43/CEE Hábitats)
- Límite de arranque
Se ha calculado a partir del artículo: *“Species, thallus size and substrate determine macroalgal break force and break location in a low-energy soft-bottom lagoon”* (Mads S. Thomsen, 2004).
- Calidad del agua
La calidad del agua se ha obtenido a partir de los datos del IH Cantabria (2021).
- Proximidad a poblaciones de especies alóctonas
La proximidad a especies alóctonas ha sido generada a partir de los datos de presencia de *Asparagopsis Armata*, que se ha obtenido a partir los datos del IH Cantabria (2021).

Compatibilidad de usos

La relación de usos y actividades contemplados en este trabajo se corresponden con los definidos en el **Real Decreto 363/2017**, de 8 de abril, por el que se establece un marco para la ordenación del espacio marítimo.

- Zonas de pesca
Las zonas de pesca se han obtenido a partir de los datos facilitados por el IH Cantabria.
- Zonas de acuicultura.
Las zonas de acuicultura se han obtenido a partir de los datos facilitados por el IH Cantabria.
- Espacios naturales protegidos.
Los espacios naturales protegidos se han obtenido de la plataforma Mapas Cantabria, <https://mapas.cantabria.es/>
- Prospección, explotación, extracción gas.
- Rutas de Transporte marítimo.
- Zonas de vertido al mar.
Las zonas de vertidos se han obtenido a partir de los datos facilitados por el IH Cantabria.
- Zonas militares.
- Zonas de extracción de materias primas.
- Cables/Tuberías/Emisarios submarinos.
Esta información se ha obtenido a partir de los datos facilitados por el IH Cantabria.
- Turismo recreativo, cultural, deportivo.
- Patrimonio cultural/Arqueológico submarino.
- Depósitos de dragado.

4.3. Evaluación de zonas óptimas

La metodología desarrollada para evaluar las zonas óptimas para la instalación de arrecifes consta de dos fases de evaluación. En la primera fase se analiza la costa cantábrica empleando por un lado criterios de evaluación físicos, referentes al entorno en el que se sitúa el arrecife, y por otro lado biológicos, referentes a las comunidades que se espera colonicen el arrecife. El resultado de este análisis son dos mapas de idoneidad: idoneidad física e idoneidad biológica. Estas zonas física y biológicamente idóneas se integran aplicando el principio de valor crítico para obtener un mapa de zonas potencialmente óptimas en las que, sin interacciones externas se podría desarrollar un uso normal del arrecife. En la segunda fase se analiza dónde es indicada la colocación de los arrecifes, a través de criterios de compatibilidad. El producto de este último análisis descarta las zonas que interfieran negativamente con los usos actuales del espacio marítimo y da como resultado las **Zonas Óptimas**. La metodología desarrollada para evaluar las zonas óptimas para la instalación de arrecifes se adecúa al esquema indicado en la *Figura 3*.

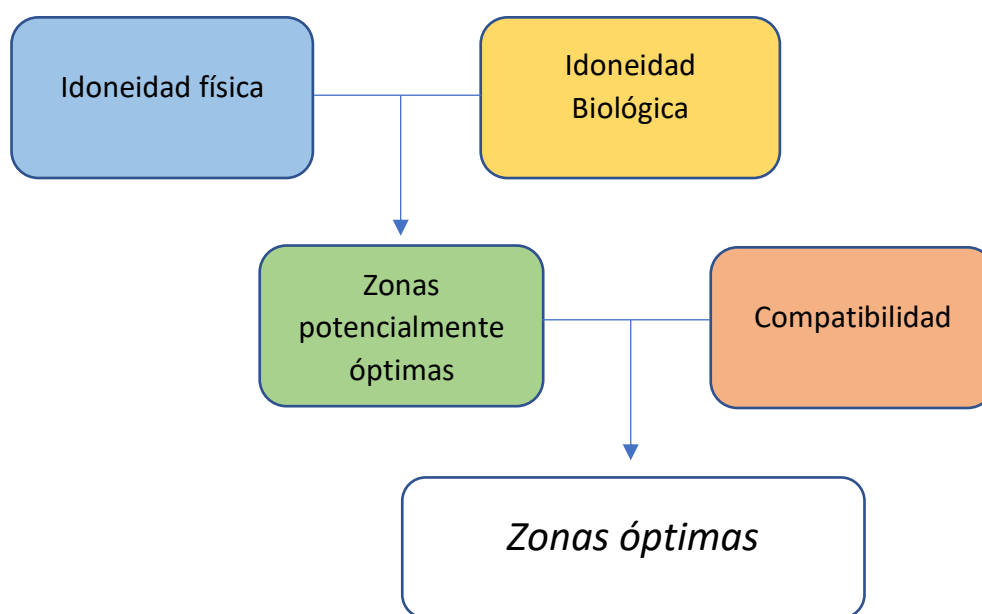


Figura 3. Organigrama propuesto para la evaluación de las zonas óptimas

4.3.1. Idoneidad Física

La idoneidad Física se refiere a los efectos de la interacción del arrecife con el entorno en el que va a ser colocado y explotado y va a ser el que sirva para hacer una primera diferenciación entre zonas idóneas y no idóneas. Para ello se seleccionan una serie de variables, se evalúan individualmente su idoneidad y se integran reconociendo las zonas donde todas las variables presentan condiciones idóneas. Las variables físicas a evaluar son las siguientes:

- **Profundidad**

Es preciso establecer un límite superior y un límite inferior en la batimetría para lo que se tendrán en cuenta las capacidades mecánicas de la estructura y los límites biológicos que supone el tener el arrecife sumergido en el agua.

El límite superior viene definido por las capacidades mecánicas del arrecife ya que la estabilidad de la estructura se puede ver comprometida en determinadas situaciones de oleaje. Al paso de una ola no solo se transmite energía en la superficie, sino que también parte de la energía se transmite al fondo marino, o al menos hasta cierta profundidad, por lo cual se ha de establecer una profundidad mínima de trabajo a la que la influencia de la ola sea nula. Se hará un análisis de equilibrio ante el vuelco en el que intervienen principalmente tres fuerzas, una estabilizadora que es el peso y dos desestabilizadoras, que son la generada por la energía de la ola al impactar con la estructura y el empuje vertical al que se ve sometido el arrecife por estar sumergido.

- **Peso del arrecife**

Cuenta con una masa de 1000 kg. Este peso en el seno de la gravitación terrestre ejerce una fuerza vertical y hacia abajo aplicada en el centro de gravedad de la estructura de 9810 Newtons. Al estar sumergido en el mar, existe sobre el arrecife un empuje vertical y hacia arriba de la misma magnitud que el peso del fluido desalojado, que teniendo en cuenta las densidades del acero y del mortero empleado y los pesos secos de las dos piezas que van unidas se puede calcular un volumen de $0,332 \text{ m}^3$, que desaloja un fluido que ejerce una fuerza de en torno a 3500 N. La diferencia entre el peso del arrecife y este empuje es la fuerza estabilizadora, de 6310 N, que procura mantener el arrecife en pie.

- **Empuje del oleaje**

El oleaje a su paso arrastra grandes masas de agua y de esta manera ejerce una fuerza sobre las estructuras con las que se encuentra. En este caso choca contra una “pila” de 90 cm de altura y 80 cm de diámetro y sobre ella ejerce una fuerza que se tendrá en cuenta

aplicada en su centro de gravedad. Esta fuerza se desarrolla en la siguiente formulación, descrita por J. R. Morrison¹ en 1953:

$$dF = dF_d + dF_i = \frac{1}{2} C_d \rho D u |u| dz + \rho C_m \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} dz$$

Donde:

- u, es la velocidad orbital de la masa de agua que mueve la ola
- D, es el diámetro del arrecife, 0.9 m.
- ρ, es la densidad del agua, equivalente a 1025 kg/m³.
- Cd, es el coeficiente de arrastre y Cm es el coeficiente de inercia y toman los valores 1.3 y 1.2, respectivamente.

Se ha de integrar la fuerza a lo largo de la altura del arrecife para los dos términos de la expresión y así acabar con la siguiente fórmula:

$$F = 0.5 \times C_d \times \rho \times D \times u \times |u| \times h + \rho \times C_m \times A \times h \times a$$

- h, es la altura del arrecife; 0,9 m.
- A, es la sección del arrecife; 0,5 m².
- a, es la aceleración horizontal de la masa de agua producida por la ola.

Sustituyendo los valores conocidos resulta:

$$F = 360 \times u \times |u| + 310 \times a$$

La fuerza que genera el oleaje depende directamente entonces de la velocidad y aceleración del mismo, e indirectamente de la longitud de ola, el periodo, la altura y la profundidad del lugar, ya que no toda la energía que la ola transmite llega hasta fondo, esta profundidad es la que va a servir para delimitar las zonas óptimas y separarlas de las que no lo son.

La longitud de onda de la ola se conocerá a través de la expresión de Fenton & McKee²:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \left(\tanh \left(2\pi \frac{\sqrt{h}}{T} \right)^{\frac{3}{2}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

¹ J.R. Morrison (1953). The Force Distribution Exerted by Surface Waves on Pile. Institute of Engineering Research, Waves Research Laboratory, Technical Report Series 3, Issue 345.

² J.D.Fenton, W.D.McKee (1990). On calculating the lengths of water waves. Coastal Engineering. Volume 14, Issue 6, December 1990, Pages 499-513.

Las expresiones de la velocidad (u) y la aceleración (a) son dadas por la teoría lineal de ondas, donde:

$$\begin{aligned} u &= \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh(kh)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) \\ a &= \frac{H}{2} g k \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) \end{aligned}$$

Donde:

- ω , velocidad angular, es dos veces el número pi entre el periodo en segundos.
- K, es el número de ola, igual a dos veces el número pi entre la longitud de onda en metros.
- H, es la altura de ola en metros.
- g, la aceleración de la gravedad, se asume 9,81 m/s²
- x y t, son parámetros locales de cada ola en metros y segundos, respectivamente. Sirven para analizar los distintos instantes de la ola, por lo que se centrará la x en 0 m y se analizará la ola en el instante en el que sea más desfavorable.

Asumiendo lo anterior las expresiones se simplifican a:

$$\begin{aligned} u &= \pi \frac{H}{T} \frac{\cos(\frac{2\pi t}{T})}{\tanh(kh)} \\ a &= \pi \frac{H}{L} g \frac{\cosh(\frac{2\pi H}{L})}{\cosh(\frac{2\pi h}{L})} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \end{aligned}$$

Y la expresión de la fuerza de J.R. Morrison pasa a ser la siguiente:

$$\begin{aligned} F &= 360 \times \pi \frac{H}{T} \frac{\cos(\frac{2\pi t}{T})}{\tanh(kh)} \times \left| \pi \frac{H}{T} \frac{\cos(\frac{2\pi t}{T})}{\tanh(kh)} \right| \\ &\quad + 310 \times \pi \frac{H}{L} g \frac{\cosh(\frac{2\pi H}{L})}{\cosh(\frac{2\pi h}{L})} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \end{aligned}$$

Por compleja que parezca la formulación depende del periodo del oleaje, la altura de ola significativa y la profundidad, además de la fase en la que se encuentre, aunque se analizará siempre el punto en el que más energía transmite la ola.

Se ha de establecer un límite en el periodo y otro en la altura de ola que se espera, ya que no es imposible que se acerque una ola mayor que desestabilice la estructura. Esta ola tendrá un periodo de 14 segundos y la altura correspondiente al periodo de retorno 50 años extraída del régimen extremo del banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado, que tiene una altura significativa de 9,49 m.

La fuerza horizontal umbral que soporta la estructura es de 8300 N. Se establecen así todos los límites condicionales y se

puede analizar a qué profundidades el arrecife se encuentra estable y lejos de la interacción del oleaje.

Esta profundidad es a partir de los 10 metros, por lo que se descartan directamente todas las zonas con menos de 10 metros de profundidad.



La luz es una variable limitante para el crecimiento de las algas, que tras su instalación son los primeros organismos que se asientan sobre este tipo de estructura.

Imagen 4. Arrecife artificial implementado en la bahía de Santander. Cedida por GITECO.

Por ello, se establece como límite inferior 30 metros de profundidad ya que un defecto de luz supone un gran obstáculo a los organismos productores. Teniendo en cuenta esto y que el objetivo de la implantación de arrecifes artificiales es la recuperación y conservación de la vida marina y la mayor conectividad de hábitats, desplegar los arrecifes en profundidades mayores limita en gran medida el número de especies capaces de habitar en estas estructuras.

La Tabla 1, en el apartado 4.4 Análisis de los datos, recoge los umbrales definidos como límite superior e inferior de profundidad.

- **Pendiente del fondo**
Para asegurar la estabilidad del arrecife, dada la base plana de este, ha de ser apoyado sobre una superficie horizontal ya que en el caso de estar inclinado podría volcar. Se establece entonces un límite de la pendiente en un 6% (Tabla 1) ya que con ello se asegura que la superficie en la que se apoye el arrecife sea horizontal, pendientes superiores pueden inducir a error en los cálculos de estabilidad de la estructura, que están ideados para superficies horizontales.
- **Tipo de sustrato**
El objetivo de instalar arrecifes es incrementar la diversidad generando nuevos hábitats para las comunidades biológicas en fondos sedimentarios. Por ello, la metodología propuesta buscará y seleccionará los fondos de arena (Tabla 1) como zonas idóneas para el establecimiento de arrecifes artificiales.

- Estabilidad de la estructura

El arrecife ha de ser solidario con el fondo en el que se apoya y mantenerse vertical en la posición en la que se deposite. Por ello, se tiene que valorar su estabilidad frente a la corriente de fondo existente a lo largo de toda la costa. Se analizará la estabilidad al deslizamiento en función de la velocidad orbital de fondo, ya que esta genera un esfuerzo prácticamente constante en el tiempo que podría acabar empujando el arrecife. Si este se viera arrastrado a una zona no óptima todo el proceso previo a su instalación habría sido inútil ya que no se estaría explotando bajo las condiciones indicadas, por eso es importante establecer el umbral de velocidad de corriente.

Para este análisis se empleará la formulación de Akeda et al., (1992) sobre estabilidad de rocas en aguas marinas, en el que se analiza la masa que ha de tener una roca solitaria para no ser arrastrada por la velocidad de una corriente de agua en el lecho marino ³.

La formulación propuesta es la siguiente:

$$M = C \times U^6$$

Donde:

- M, es la masa en kilogramos de la roca, en este caso 1000 kg
- C, es una constante de valor 25
- U, es la velocidad máxima descrita que se busca en m/s

Por lo que queda que $U = \sqrt[6]{\frac{M}{C}}$ y por tanto esa velocidad límite es de 1.85 m/s (Tabla 1).

³ Akeda S.; Takagi N.; Tanaka K.; National Research Inst. of Fisheries Engineering, Hasaki, Ibaraki (1992). Experimental study on stability of rocks for improvement and development of fishing ground in shallow sea.

4.3.2. Idoneidad Biológica

Se refieren a la interacción de los arrecifes con los organismos que se espera los colonicen. Para ello se ha de seleccionar una serie de variables, para evaluar individualmente su idoneidad e integrar reconociendo las zonas donde todas las variables presentan condiciones idóneas. Las variables a evaluar son las siguientes:

- Conectividad ecológica

Se denomina conectividad ecológica a la capacidad de los organismos para trasladarse de una zona a otra e intercambiar individuos de sus poblaciones.

De acuerdo con ello, para facilitar el asentamiento de organismos en los arrecifes la metodología desarrollada busca la proximidad de hábitats con funciones ecológicas equivalentes a una distancia apropiada. Es decir, se busca la presencia de sustratos rocosos. El indicador utilizado para evaluar la conectividad es la presencia del hábitat de Arrecifes (Hábitat 1170) estableciendo como zonas idóneas las que se encuentran a una distancia máxima del hábitat de 1000 m (Tabla 1). El hábitat 1170 se caracteriza por sustratos compactos y duros sobre fondos sólidos que se levantan desde el fondo marino en la zona sublitoral y litoral. Los arrecifes pueden albergar una zonación de comunidades bentónicas de especies de animales y algas, así como concreciones y concreciones coralígenas.

- Límite de arranque

La corriente orbital de fondo genera una tensión que tiende a separar a los organismos de la estructura; para que estos no se vean sobrepasados por la velocidad del agua existe un valor límite que se denomina límite de arranque.

La geometría de los arrecifes seleccionados dispone de orificios y zonas de sombra que ofrecen una gran cantidad de áreas de resguardo de estas tensiones superficiales que arrancarían los organismos del arrecife bajo condiciones adversas. Por consiguiente, es necesario establecer un valor máximo de velocidad de la corriente por encima del cual no sea posible el asentamiento de las comunidades biológicas.

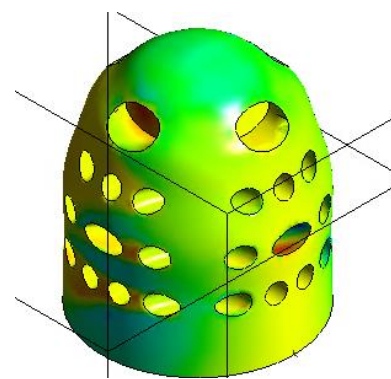


Figura 4. Mapa de tensiones superficiales en un arrecife artificial. Cedido por GITECO.

El valor límite de velocidad en la superficie del arrecife que soportan las macroalgas antes de desprenderse viene dada por la siguiente formulación de Thomsen (2004)⁴:

⁴ Mads S. Thomsen. (2004). Species, thallus size and substrate determine macroalgal break force and break location in a low-energy soft-bottom lagoon. Aquatic Botany 80 (2004) 153–161.

$$U_{Break} = \left[\frac{2 \times F_{Break}}{C_{Drag} \times A_{Plan} \times \rho} \right]^{0.5}$$

Donde:

- U_{Break} es la velocidad del fluido que generaría el desprendimiento del organismo, el resultado se entrega en m/s.
- F_{Break} es la fuerza horizontal necesaria para arrancar al organismo del sustrato y se aplica en N.
- C_{Drag} es el coeficiente de arrastre, depende de diversos factores, pero su valor es cercano a 0.1 y por simplicidad de cálculo se aplica ese valor.
- A_{Plan} es el área efectiva de arrastre de cada individuo.

De esta expresión, en la que se tiene una fuerza sobre una superficie, se puede llegar a la siguiente, en la que aparece una tensión τ .

$$U_{Break} = \left[\frac{2 \times \tau}{C_{Drag} \times \rho} \right]^{0.5}$$

El criterio utilizado se obtiene de los resultados de los ensayos experimentales llevados a cabo por Thomsen (2004), que establecen un umbral de 2,5 m/s para pequeñas especies de macroalgas (tipo *Ulva curvata*) adheridas a conchas de bivalvos (Tabla 1).

- Calidad de agua

La calidad del agua ha de ser óptima en términos de oxígeno disuelto, Ph y vertidos existentes, siendo descartadas directamente las zonas con un estado ecológico de las masas de agua deficiente, por la dificultad que encuentran los organismos para sobrevivir en esas condiciones. Por tanto, en el marco del presente trabajo se consideran idóneas las masas de agua con un estado ecológico Bueno (*sensu* Directiva 200/60/CE Marco del Agua) (Tabla 1).

Todos esos parámetros son tenidos en cuenta en la cartografía de la que se dispone, donde se separa la costa de Cantabria en siete sectores de similar longitud y se clasifica el estado del agua en cinco categorías que



varían en sus extremos de “Muy Bueno” a “Muy Deficiente”.

Imagen 5. Arrecife artificial instalado en la bahía de Santander. Cedida por GITECO

- Presencia de especies alóctonas

Para los organismos marinos encontrar arrecifes artificiales situados en amplias zonas de arena supone un punto de protección en un medio en el que únicamente encontrarían agua y depredadores, pero estos organismos no son los únicos beneficiados por estas estructuras, ya que también constituyen un refugio para numerosas especies invasoras que a falta de competidores en el entorno, se adueñan de ellas y las colonizan en exclusiva, sin permitir que proliferen otros organismos y reduciendo así la biodiversidad.

En este sentido, hay que mencionar que en la zona de estudio se puede encontrar *Asparagopsis Armata*, un tipo de alga que no es natural de la zona.

Esta alga de color rojizo está categorizada como especie invasora y puebla algunas zonas del litoral cantábrico.

Las zonas idóneas buscan, por tanto, lugares donde no exista o, al menos no se tenga registro de su presencia. La proliferación de este tipo de alga en el arrecife acabaría con el propósito del mismo, que es el aumento de la biodiversidad.



Imagen 6. Ejemplar de *Asparagopsis Armata*. Fuente: [wwwhttp://www.canariasconservacion.org/](http://www.canariasconservacion.org/)

De acuerdo con ello, en la búsqueda de zonas idóneas se ha establecido una distancia mínima de 500 metros a comunidades de esta especie (Tabla 1).

4.3.3. Compatibilidad con los usos del espacio marítimo

Hasta ahora se han analizado las cualidades físicas y biológicas que ha de reunir cada zona para ser potencialmente un buen emplazamiento para los arrecifes; no obstante, también se ha de evaluar si es realista la implantación de arrecifes en esas zonas a priori idóneas.

Para ello, se identifican los posibles usos y actividades desarrollados en el medio marino y se evalúa si los arrecifes son compatibles con ellos. Han sido extraídos del Real Decreto 363/2017, donde se establecen.

- | | |
|--|--|
| - Zonas de pesca | - Zonas de extracción de materias primas |
| - Zonas de acuicultura | - Cables, tuberías y emisarios |
| - Prospecciones o explotaciones de gas | - Patrimonio cultural-arqueológico |
| - Rutas de transporte marítimo | - Depósitos de dragados |
| - Zonas de vertidos al mar | - Rutas migratorias de mamíferos |
| - Zonas militares | |

Ahora se analizará si son compatibles o no los arrecifes artificiales con usos de la zona para poder excluir posteriormente aquellas zonas de interferencia con usos no compatibles.

Se seguirán los siguientes criterios en cada uso:

- Espacios marinos protegidos
En la costa cantábrica se pueden encontrar tres espacios naturales protegidos que son la Isla de Mouro, el Islote de Portio y la Isla de Conejera.
- Se trata de ZEPAs, Zonas de Especial Protección para Aves, recogidas en la *Red Natura 2000* elaborada por el ahora Ministerio de Transición Ecológica, por lo que no debería existir interacción directa de los arrecifes con estos espacios protegidos así que todos ellos serán indicados como **compatibles** con la ubicación de los arrecifes.
- Efluentes y emisarios submarinos
Existe una red de colectores y emisarios submarinos a lo largo de la costa cantábrica, en general se trata de efluentes de agua tratada pero no siempre esas aguas se encuentran en las mejores condiciones bien sea por fallos técnicos en los procesos o por eventos de fuertes precipitaciones que originan escorrentías que desembocan en el mar y arrastran hasta él todo lo que encuentran. Esta información de efluente ya viene incluida en la calidad de las masas de agua por lo que la única precaución que se ha de tener es la de no situar el arrecife encima de ningún emisario por riesgo de rotura del mismo u obstrucción a su salida. Así pues, la implantación de arrecifes en el entorno de un emisario submarino es **no compatible**.

- **Zonas de pesca**
El objetivo de la implementación de arrecifes artificiales es la conservación y el desarrollo de la biodiversidad, por lo que resulta incompatible situarlos en zonas designadas para la pesca o en caladeros conocidos en los que lleven a cabo estas prácticas. Independientemente del tipo de pesca que se lleve a cabo en estos lugares, ya sea arrastre, trasmallo o simples palangres, son usos **no compatibles** con los arrecifes artificiales.
- **Rutas de transporte marítimo:**
El golfo de Vizcaya es una zona con gran afluencia de cargueros. En las inmediaciones de la costa cantábrica se localizan los puertos comerciales de Santander y Bilbao, aunque dadas las profundidades a las que se colocan los arrecifes, estos no deberían interferir con el correcto tránsito de buques de cualquier índole, de ahí que se considerarán **compatibles** los arrecifes con el tráfico marítimo siempre y cuando no se sitúen en dispositivos de regulación de tráfico, como son las canales de entrada y salida de puertos.
- **Extracción de materias primas y prospecciones de gas:**
Tanto el gas como el petróleo requieren estar encapsulados en un cuerpo macizo y estanco, por lo que solo se pueden encontrar en fondos rocosos. Este tipo de actividad **no es compatible** con la implantación de arrecifes artificiales por la complejidad de las estructuras dedicadas a la extracción de estas materias primas.
- **Zonas de maniobras militares:**
Los ejercicios de la Armada, en el caso de desarrollarse en el litoral cantábrico, no se ven afectados por la existencia de arrecifes artificiales ya que las maniobras de desembarco se ejecutan en aguas someras con profundidades inferiores a 10 metros y los ejercicios de tiro han de desarrollarse en zonas delimitadas y alejadas de la costa; por tanto, resultan **compatibles**.
- **Turismo recreativo:**
Las actividades recreativas que tienen lugar en el mar son muy diversas por lo que se analizarán varias por separado.

Navegación recreativa:

La náutica de recreo abarca embarcaciones desde los 2,5 hasta los 24 metros de eslora. Son estos últimos los que mayor calado tienen y aun así no superan en ningún caso, ni los de motor ni los de vela, los 9 metros de calado por lo que un arrecife situado a una profundidad de 10 metros no supone ninguna contraindicación a la navegación de recreo.

Buceo deportivo:

Lejos de ser incompatible con el buceo, la implantación de arrecifes artificiales mejora la biodiversidad submarina y puede suponer un atractivo para esta práctica.

Pesca recreativa:

Llevada a cabo desde embarcaciones de recreo o desde la costa no interfiere con los arrecifes artificiales ya que están a más de 10 metros de profundidad, a pesar de ello habrá que tenerla en cuenta porque va en contra de los objetivos de conservación y recuperación de la biodiversidad que persiguen los arrecifes.

Por todo esto se pueden dar las actividades recreativas como **compatibles** con la práctica de arrecifes artificiales.

- Depósitos de dragados:

En un ejercicio de dragado se dan dos situaciones, la extracción de material del fondo marino y la reubicación de este material en otro lugar y ambas actividades interfieren con el correcto funcionamiento de los arrecifes por lo que estos **no son compatibles** con zonas en las que haya dragados.

- Patrimonio cultural/arqueológico:

La ubicación de los arrecifes podría estropear el estado de conservación del patrimonio cultural o arqueológico que se pudiera encontrar sumergido, por lo que la implantación de arrecifes **no es compatible** con las zonas en las que existe este patrimonio.

4.4. Análisis de los datos

En la Tabla 1 se recogen las variables de los tres elementos de análisis (idoneidad física, biológica y compatibilidad) y sus criterios de evaluación. La metodología busca zonas óptimas para la instalación y funcionalidad de arrecifes artificiales en términos de idoneidad física y biológica, y que al mismo tiempo sean compatibles con los usos del espacio marítimo. Es decir, se buscan zonas con fondos de arena, de poca pendiente, comprendidas entre los 10 y los 30 metros de profundidad, en las que haya buena calidad del agua y una corriente inferior a los 1,85 m/s. Además, han de situarse en las proximidades de hábitats rocosos, pero lejos de las comunidades de *Asparagopsis Armata* y no han de interferir con los usos del espacio marítimo con los que no son compatibles.

Variable	Criterio
Idoneidad física	
Batimetría (m)	10-30
Pendiente	0-6%
Tipo de sustrato	Arena
Estabilidad de la estructura	Velocidad orbital fondo máxima (m/s) < 1,85
Idoneidad biológica	
Conectividad con hábitats rocosos	Buffer 1 km
Límite de arranque	Vel. orbital fondo máxima (m/s) < 2,5
Calidad de las masas agua	Buen estado ecológico
Proximidad a poblaciones de especies alóctonas para evitar el efecto “steeping stones” (<i>Asparagopsis armata</i>)	Buffer 0.5 km
Compatibilidad con usos del espacio marítimo (RD 363/2017)	
Compatible	
Zonas pesca	No
Zonas de acuicultura	No
Espacios naturales protegidos	Sí
Prospección, explotación, extracción gas	No
Rutas de Transporte marítimo	Sí
Zonas de vertido al mar	No
Zonas militares	Sí
Zonas de extracción de materias primas	No
Cables/Tuberías/Emisarios	No
Turismo recreativo, cultural, deportivo	Sí
Patrimonio cultural/Arqueológico submarino	No
Depósitos de dragado	No

Tabla 1. Variables y criterios de evaluación

Los análisis relativos a la dimensión espacial y la generación de mapas se han efectuado en ArcMap 10.7, previa conversión a formato GIS. Todas las capas han sido proyectadas al sistema ETRS89 para el huso horario 30N y el análisis de los datos se ha llevado a cabo en formato ráster, previa conversión de las capas de información en formato Shapefile al formato de trabajo indicado. Con independencia de su origen y tipo (in situ, imagen de satélite, reanálisis, etc.), los datos se han descargado de su fuente original en formato Shapefile para poder ser convertidos a ráster y trabajados en el software indicado. Los análisis de velocidad de corriente se han generado con MatlabR2020b y Excel para después ser exportados ArcMap y trabajados en formato ráster.

5. Resultados

La metodología desarrollada se ha aplicado en la costa de Cantabria y los resultados obtenidos muestran por un lado un análisis descriptivo del medio y por otro los resultados de los distintos elementos de análisis que conforman la metodología.

5.1. Análisis descriptivo de las variables

Variables de la Idoneidad física

5.1.1. Profundidad:

El criterio empleado para evaluar la batimetría establece el rango de zonas adecuadas desde los 10 hasta los 30 metros de profundidad. En base a este rango, se reconoce la zona de la costa de Cantabria que cumplen con el criterio, (Figura 5)

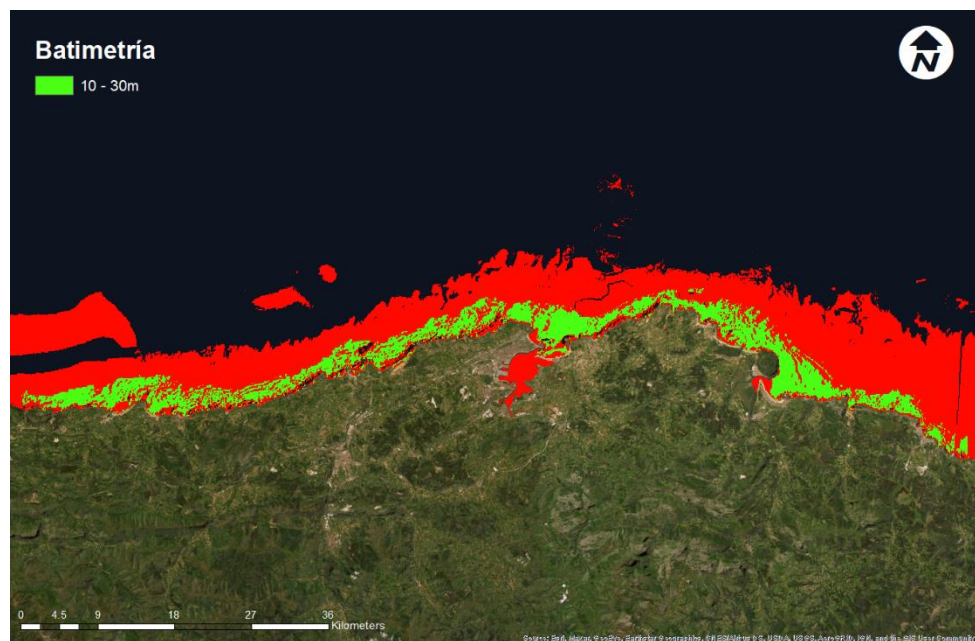


Figura 5. Mapa de la batimetría idónea. Generación propia con ArcMap.

5.1.2. Pendiente de fondo:

La pendiente del fondo en el que se apoyen los arrecifes ha de ser inferior al 6%. Aplicado este límite se obtienen los resultados mostrados en la *Figura 6*.

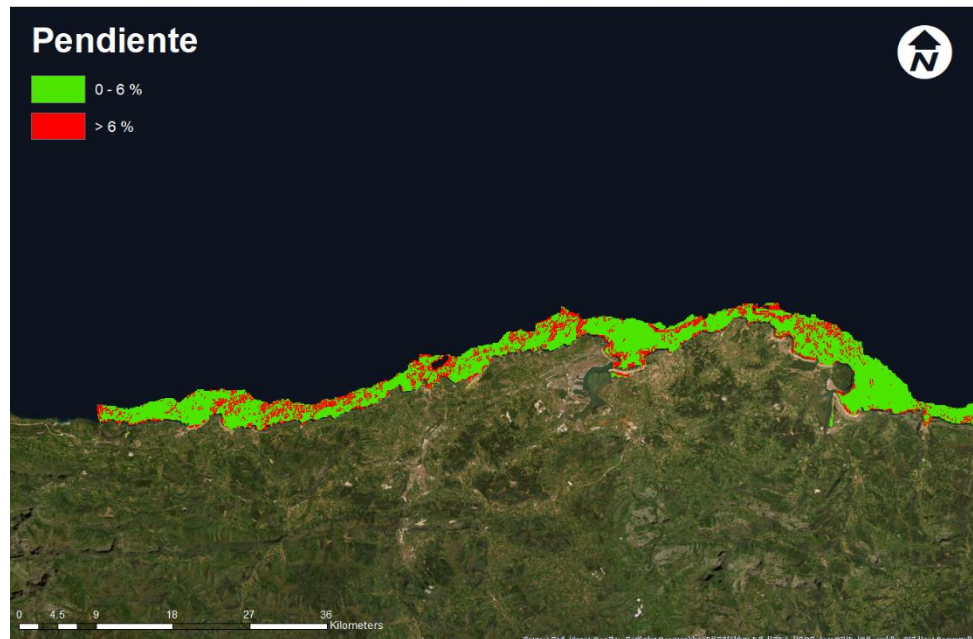


Figura 6. Mapa de pendientes. Generación propia con ArcMap.

5.1.3. Tipo de fondo:

Incorporada la información espacial en el software se discretiza entre zonas de arena y zonas de roca, representadas en verde y rojo respectivamente en la *Figura 7*.

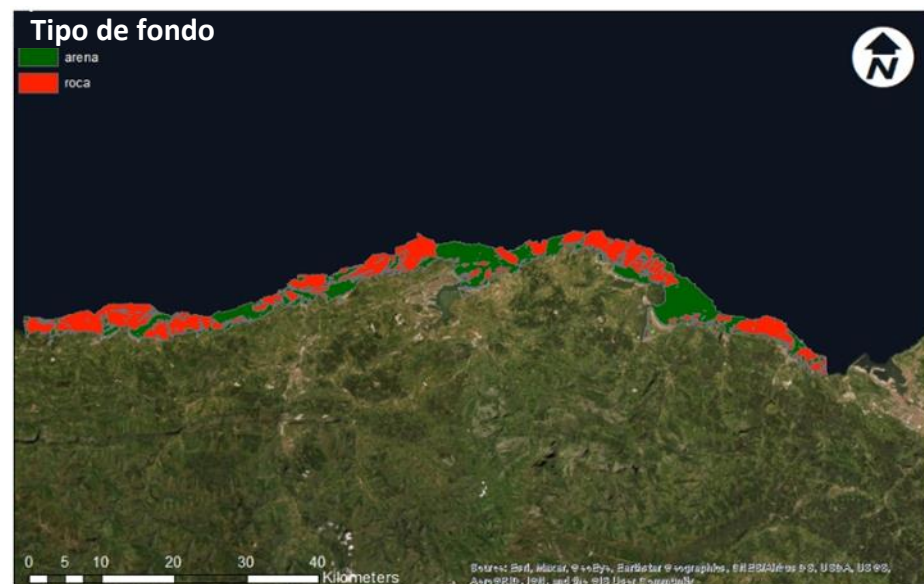


Figura 7. Mapa del tipo de fondo. Generación propia con ArcMap.

5.1.4. Estabilidad de la estructura

La integración de los datos de velocidad de fondo da como resultado la *Figura 8* en la que se aprecia que las velocidades inferiores a 1.85 m/s se alcanzan en las zonas más someras y cercanas a costa.

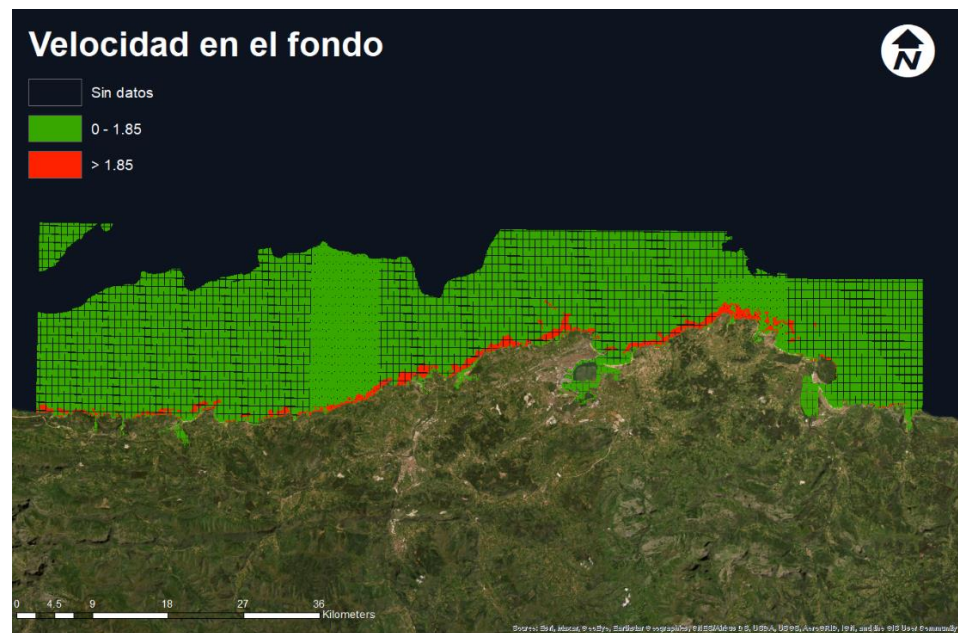


Figura 8. Mapa de velocidad en el fondo. Generación propia con ArcMap.

Variables de la idoneidad biológica

5.1.5. Conectividad ecológica

Aplicando el criterio de conectividad al área de estudio, distancia máxima de 1000 metros a hábitats rocosos, se obtienen las zonas idóneas en términos de conectividad ecológica (Figura 9).



Figura 9. Mapa de conectividad con el hábitat 1170. Generación propia con ArcMap.

5.1.6. Límite de arranque

La Figura 10 es el resultado de la discretización de zonas en las que la velocidad de la corriente fuera mayor de 2,5 m/s (umbral para el límite de arranque).

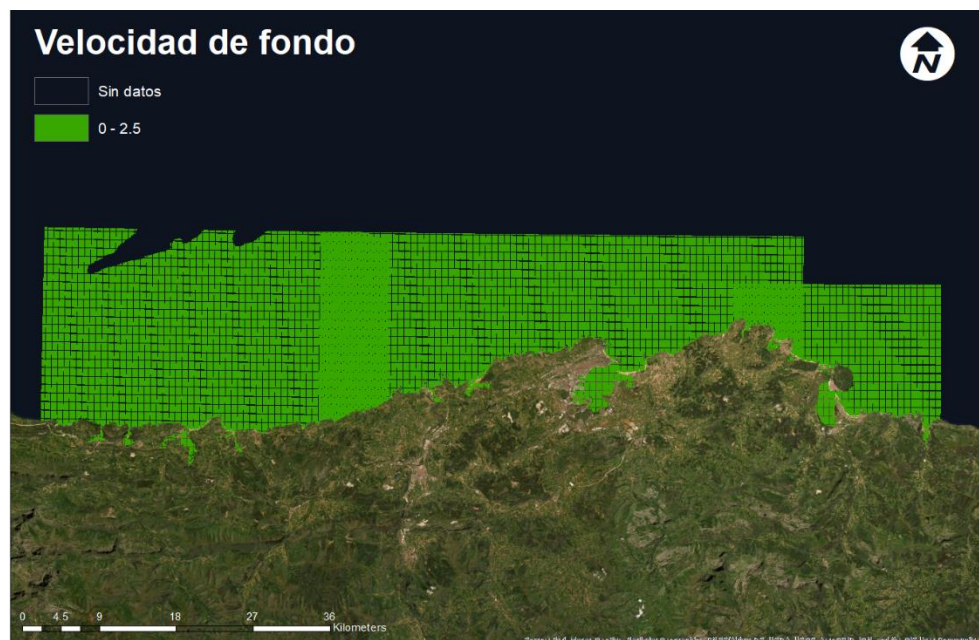


Figura 10. Mapa de velocidades de corriente en el fondo. Generación propia con ArcMap.

5.1.7. Calidad de las masas de agua

En la zona de estudio no hay problemas con la calidad del agua en ningún punto de la costa. Tan solo a la salida de la bahía de Santander y en la zona más oriental y cercana al puerto de Bilbao la calidad del agua es moderada sin llegar a mala, como se puede apreciar en la *Figura 11*. Las zonas al oeste de Cabo Mayor y entre cabo Ajo y el monte Buciero presentan un estado ecológico bueno.



Figura 11. Mapa de calidad de las masas de agua. Generación propia en ArcMap.

Con carácter general Cantabria es potencialmente un buen emplazamiento para los arrecifes artificiales, siendo más indicadas las zonas al este de monte Buciero y las que se encuentran al oeste de Cabo Mayor.

5.1.8. Proximidad a especie alóctonas

Se sabe que el *Asparagopsis Armata* se encuentra a distintas batimetrías y en distintas concentraciones a lo largo de la costa cantábrica, como se muestra en la *Figura 12*.

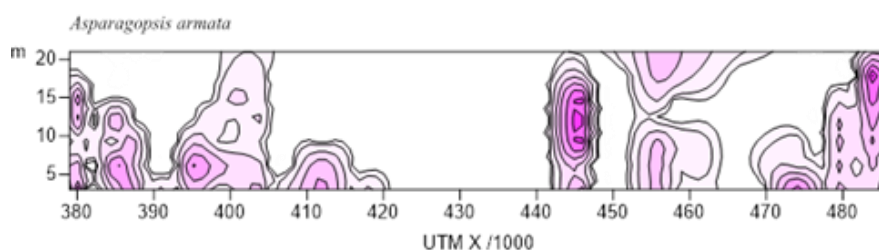


Figura 12: Mapa batimétrico de la ubicación de *Asparagopsis Armata*. Cedido por IH Cantabria

De la *Figura 12*, extraemos las zonas que rodean las comunidades de *Asparagopsis Armata* a una distancia de 500 metros a cada comunidad, como se muestra en el resultado de la *Figura 13*.



Figura 13. Mapa de comunidades de Asparagopsis Armata. Generación propia con ArcMap.

Se puede apreciar como esta especie invasora se encuentra a lo largo de todo el litoral cantábrico en las zonas más próximas a costa.

5.1.9. Compatibilidad

A partir de los usos del espacio marítimo incluidos en el Real Decreto 363/2017 se ha analizado si estos existen o no en la zona de estudio y el resultado se ha concretado en la Tabla 2. Posteriormente se compararon las zonas potencialmente óptimas (idoneidad física + biológica) con aquellos usos del espacio marítimo que, siendo no compatibles según lo establecido anteriormente, existen en la zona de estudio.

	Espacios marinos protegidos	Efluentes y emisarios submarinos	Zonas de pesca	Rutas de transporte marítimo	Extracción de materias primas y gas	Zonas de maniobras militares	Turismo recreativo	Depósitos de dragados	Patrimonio arqueológico
Existe en la zona de estudio	Si	Si	Si	Si	No	No	Si	No	No

Tabla 2. Evaluación de la existencia de las actividades marítimas en la costa de Cantabria

5.2. Idoneidad Física

El resultado de la idoneidad física se obtiene de combinar las capas de información correspondientes a las variables de profundidad, pendiente, tipo de fondo y estabilidad de la estructura. Se pueden observar en la *Figura 14* varias zonas que son físicamente idóneas cerca de las bahías de Santander y Laredo y otras zonas de menor extensión en la zona más occidental. En conjunto, la superficie físicamente idónea es de 108,4 km²



Figura 14. Mapa de idoneidad física. Generación propia con ArcMap.

Cabría esperar una configuración de estas características en la idoneidad física, ya que las zonas entre Cabo Ajo y el monte Buciero, y la costa de Suances y la zona de la isla de Conejera se caracterizan por tener fondos de roca de gran irregularidad con importantes salientes y peñascos que dificultan la navegación en la zona. Las zonas que han sido categorizadas como idóneas son las más cercanas a estuarios y desembocaduras de ríos, donde el aporte de sedimentos es constante. En este caso, la idoneidad física es un factor muy limitante. La más limitante de las variables ha sido el tipo de fondo, porque exige fondos de arena que son, como se puede apreciar, poco habituales en el litoral cantábrico. La batimetría ha delimitado también en gran medida las zonas idóneas descartando las zonas más cercanas a costa. En definitiva, a la hora de hallar un emplazamiento potencialmente óptimo para la ubicación de arrecifes artificiales la idoneidad física parece ser la más restrictiva.

5.3. Idoneidad Biológica

En este punto se ha de analizar el entorno marino para establecer las ubicaciones que mejor respondan a las necesidades biológicas de las comunidades biológicas que se espera colonicen el arrecife.

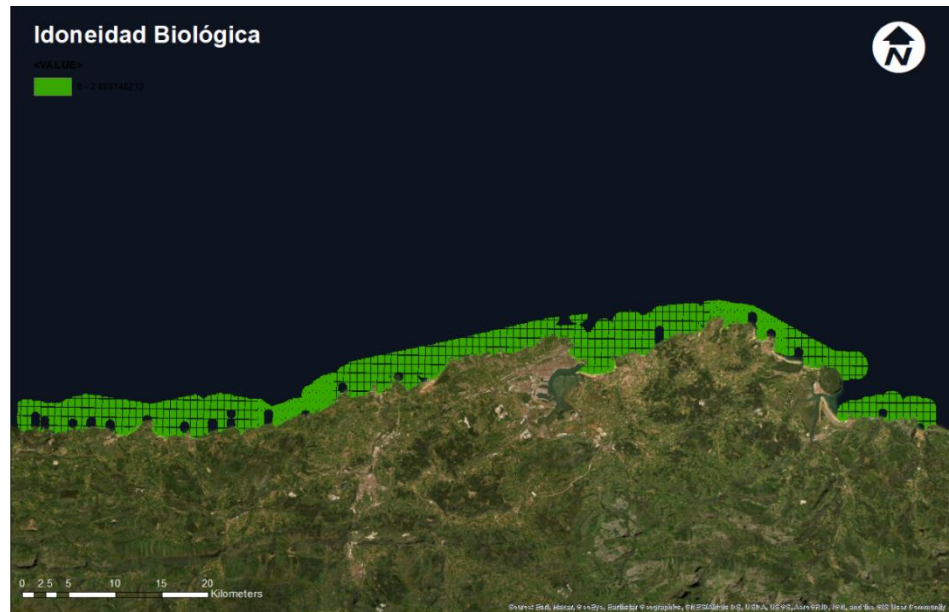


Figura 15. Mapa de idoneidad biológica. Generación propia con ArcMap.

El resultado de la idoneidad biológica, como se puede ver en la *Figura 15*, muestra una gran extensión de zonas biológicamente idóneas a lo largo de todo el litoral.

La costa cantábrica tiene grandes extensiones de zonas biológicamente idóneas para el asentamiento de comunidades biológicas, que suman más de 290 km². Este resultado se obtiene al considerar conjuntamente las variables de conectividad, límite de arranque, calidad de las masas de agua y proximidad a zonas con presencia de especies alóctonas.

La extensión de zonas idóneas biológicamente es considerable. Prácticamente todo el litoral de Cantabria es idóneo bajo estos criterios, exceptuando los lugares en los que se encuentra *Asparagopsis armata* (la *Figura 16*, huecos circulares). Se puede percibir también la diferencia con las zonas resultantes de la idoneidad física, mucho más reducidas que las obtenidas para la idoneidad biológica. Estos resultados son indicativo del buen estado ecológico de las aguas y del potencial que tienen para albergar nuevas comunidades biológicas ya que prácticamente toda la costa tiene buena conectividad ecológica y velocidades de corriente inferiores al límite de arranque definido.

5.4. Zonas potencialmente óptimas

De la agregación de la idoneidad física con la idoneidad biológica resulta el siguiente mapa de zonas potencialmente óptimas para la instalación de los arrecifes artificiales en la costa de Cantabria que se representan en verde en la *Figura 16*. Las zonas potencialmente óptimas para la implantación de los arrecifes artificiales que cuentan con una superficie total de 70 km².

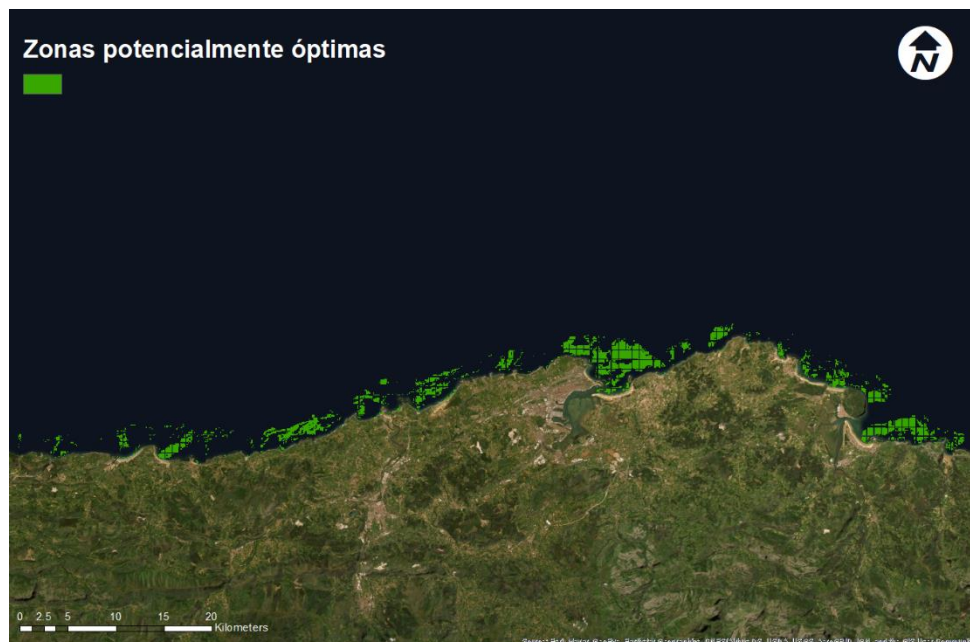


Figura 16. Zonas potencialmente óptimas. Generación propia con ArcMap.

Analizando el resultado obtenido se comprueba como las similitudes con el mapa de la idoneidad física, *Figura 14*, son palpables pues ha resultado ser el más restrictivo de los dos criterios en este estudio. Solo a la salida de la bahía de Santoña y Laredo se puede decir que el criterio biológico sea más restrictivo que el físico, en particular el criterio de conectividad con el hábitat característico de arrecifes ya que es una zona con extensos bancos de arena que impiden el intercambio de individuos entre comunidades.

Este resultado tiene dos lecturas principalmente. La primera es que unos oleajes significativamente energéticos, elevadas velocidades de la corriente y los grandes bancos de arena que caracterizan la costa de Cantabria limitan las zonas óptimas para la instalación de arrecifes. La segunda lectura es la buena calidad de las aguas que bañan la costa, en ningún punto de ella es de mala calidad y como se puede ver en la idoneidad biológica toda la costa cantábrica goza de buenas condiciones de habitabilidad para las especies marinas.

5.5. Compatibilidad con usos del espacio marítimo

Tras el análisis de las idoneidades física y biológica se ha de desarrollar el estudio de compatibilidad con los usos del espacio marítimo para lo que se incorporan al resultado de idoneidad las variables de compatibilidad definidas.

Se incorporarán aquellas variables que, siendo **no compatibles**, existen en la zona de estudio ya que las variables identificadas como compatibles no discretizan ninguna zona, estas son las áreas de acuicultura y pesca y los lugares en los que existen vertidos y emisarios submarinos. Los demás usos como las rutas de transporte marítimo o el turismo recreativo no interfieren con los arrecifes, aunque existen en la zona.

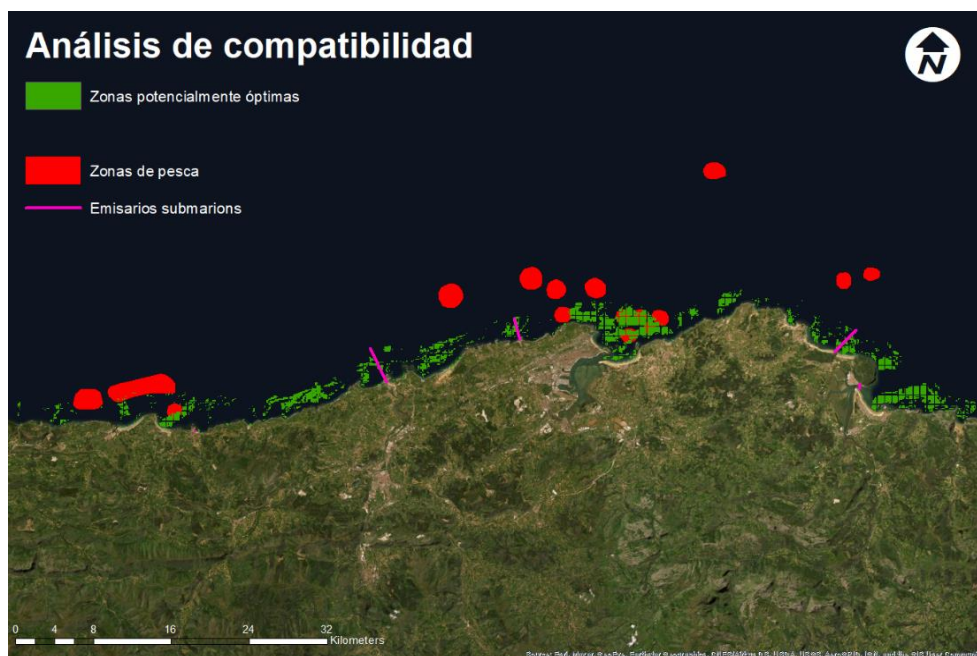


Figura 17. Análisis de compatibilidad. Generación propia con ArcMap.

El resultado del análisis de compatibilidad con los usos del espacio marítimo se ha representado en la *Figura 17*. Se puede apreciar como hay zonas de la costa cantábrica que a pesar de ser idóneas no son compatibles, lo que imposibilita la implantación de arrecifes artificiales en ellas.

Hay interferencia con zonas de pesca al norte de la playa de Oyambre y a la salida del estuario de la bahía de Santander.

El resultado del análisis son cuatro zonas sin interferencia que se pueden calificar como zonas óptimas, *Figura 18*, las cuales suman una superficie total de 35,5 km² y son las siguientes:

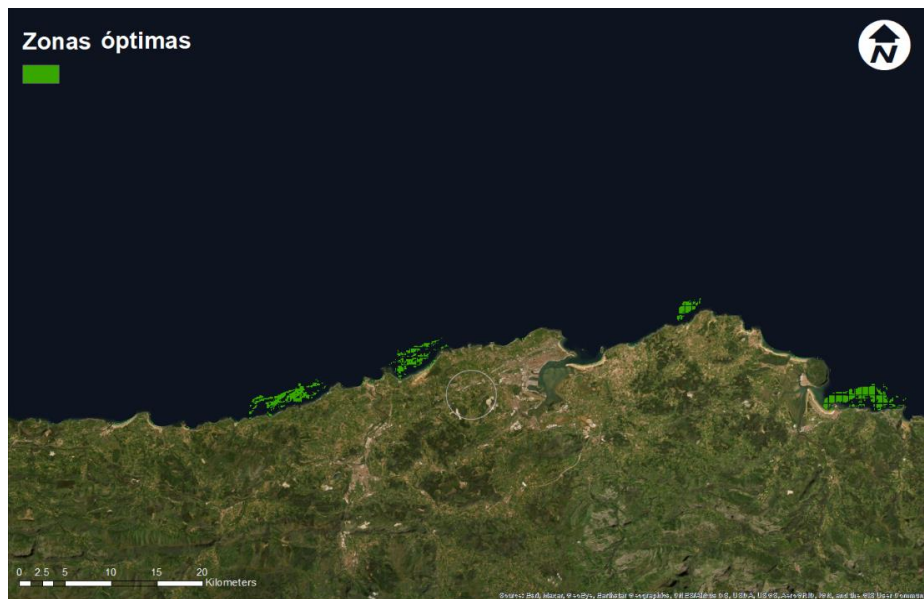


Figura 18. Zonas óptimas. Generación propia con ArcMap.

- Zona frente a la costa de Ubiarco de 10,5 km².

La zona de Ubiarco es la menos accesible de las cuatro pues, a pesar de tratarse de una zona óptima y compatible, el traslado de los arrecifes hasta ese emplazamiento puede llegar a ser arriesgado por la necesidad de portar los arrecifes navegando hasta el lugar indicado. Para minimizar el tiempo de navegación se tendría que partir de puertos con accesos angostos, de bajas batimetrías y con fondos de puntiagudas rocas que dificultan las maniobras y limitan el tamaño de la embarcación, y por tanto de la cantidad de arrecifes a trasladar en cada viaje. Partir desde otro puerto más accesible, como el de Santander, supone navegar una distancia que podría llegar a tomar cuatro horas salvar, con una carga en cubierta de una tonelada por cada bloque. Ninguna de las alternativas resulta atractiva.
- Zona frente a la playa de Valdearenas en Lienres de 8,6 km².

Esta zona, aún estando más próxima al puerto de Santander, cuenta con las mismas dificultades a la hora del traslado de los arrecifes, sigue siendo una zona óptima pero existen otras alternativas de más fácil acceso.
- Una zona de menores dimensiones frente a Cabo Ajo de 3,6 km².

La zona próxima a cabo Ajo cuenta con un puerto con toda la infraestructura necesaria para cargar los arrecifes y está a menos horas de navegación que las anteriores zonas indicadas, pero aun contando con una gran superficie es la de menor extensión de las cuatro.

- Parte sur de la salida de la bahía de Santoña y Laredo hasta llegar a Oriñón de 12,8 km².

El emplazamiento próximo a Laredo cuenta con una superficie óptima significativamente mayor que la de cabo Ajo y se encuentra más próxima si cabe a un puerto de sencillo acceso con casi cualquier tipo de embarcación, a menos de una hora de navegación, cerca de hábitats rocosos y de la salida de un importante estuario, además la calidad del agua de la zona es la única con la calificación de “muy buena” por lo que, de las cuatro zonas óptimas, esta es la más indicada a la hora de la instalación

6. Conclusiones

Con la metodología empleada en este estudio se ha conseguido identificar cuatro zonas de similar extensión y distintas características que cumplen los requisitos para alojar en su fondo los arrecifes artificiales ideados a partir del proyecto europeo 3DPARE. Dadas las características de la costa cantábrica y las notables diferencias entre las cuatro zonas identificadas se puede concluir que se ha logrado desarrollar una metodología válida para la búsqueda de una ubicación óptima para la instalación de arrecifes artificiales ya que las cuatro zonas que se han conseguido identificar tienen similitudes, pero también diferencias. Es evidente que todas cumplen con los criterios físicos, biológicos y de compatibilidad establecidos pero cada una de las regiones cuenta con características específicas: tres orientadas al noroeste y una resguardada de los temporales, dos a la salida de estuarios y dos frente a la costa, dos frente a playas y dos frente a acantilados, etc.

Además, queda latente cuán importante es que la zona no solo sea óptima, sino que también sea compatible. El abra del Sardinero, en la Zona 2, era una zona potencialmente óptima y de gran extensión, cercana a espacios marinos protegidos, a la salida de un estuario que facilitaría la población de los arrecifes y con un importante núcleo urbano en las proximidades que podría haber recibido un impacto positivo en el caso de la implantación de los arrecifes. Esta ubicación resultó no ser compatible por la incoherencia que supondría ubicar una estructura dedicada a la preservación de la biodiversidad en donde se sabe que se practica la pesca.

De los resultados de este estudio ha sido sorprendente conocer lo limitantes que eran algunos criterios, sobre todo los de la idoneidad física que han hecho pasar de los cerca de 300 km² de la idoneidad biológica a los apenas 100km², con restrictivos criterios como el de la profundidad, que dejaba solo un rango de acción de 20 metros o el de tipo de fondo. A pesar de ello la costa cantábrica parece ser una muy buena zona para la instalación de los arrecifes ya que, incluso con criterios tan restrictivos como los empleados, se han encontrado distintas zonas óptimas y a lo largo de toda la costa, que no concentradas en un único espacio.

La idoneidad biológica ha sido menos restrictiva, de los criterios incluidos en esta los más desfavorables fueron el de proximidad a especies alóctonas y el de conectividad ecológica, afectando en gran medida a la zona de la salida de la bahía de Santoña y Laredo, donde los grandes bancos de arena que hay limitan notablemente la conectividad ecológica.

Los usos del espacio marítimo supusieron una gran reducción en el área óptima para la instalación de arrecifes, que se quedó en un escaso 50% del área de costa considerada como idónea.

Desde una perspectiva a medio y a largo plazo, hay criterios como el de proximidad con especies alóctonas que pueden variar por la gran capacidad de reproducción de estas especies; no obstante, la mayoría de criterios son referidos a características físicas de la costa, y son los más limitantes de todos, por lo que el mismo estudio replicado años más tarde debería arrojar resultados similares sin embargo, la misma metodología aplicada en otras costas podría dar resultados muy distintos.

7. Referencias

- J.R. Morrison (1953). The Force Distribution Exerted by Surface Waves on Pile. Institute of Engineering Research, Waves Research Laboratory, Technical Report Series 3, Issue 345.
- J.D.Fenton, W.D.McKee (1990). On calculating the lengths of water waves. Coastal Engineering Volume 14, Issue 6, December 1990, Pages 499-513
- <https://www.emodnet.eu/en>
- Akeda S.; Takagi N.; Tanaka K.; National Research Inst. of Fisheries Engineering, Hasaki, Ibaraki (1992). Experimental study on stability of rocks for improvement and development of fishing ground in shallow sea.
- Mads S. Thomsen. (2004). Species, thallus size and substrate determine macroalgal break force and break location in a low-energy soft-bottom lagoon. Aquatic Botany 80 (2004) 153–161.
- Real Decreto 363/2017, de 8 de abril, por el que se establece un marco para la ordenación del espacio marítimo. BOE nº 86, de 11/04/2017.